AACS 60 años 1960 - 2020 ASOCIACION ARGENTINA CIENCIA DEL SUELO
60 años cuidando nuestros suelos

CIENCIA DEL SUELO

# APLICACIÓN DE BIOCHAR EN UN SUELO DEGRADADO BAJO PRODUCCIÓN DE BATATA. EFECTO SOBRE PROPIEDADES EDÁFICAS

LUIS ANTONIO MILESI DELAYE[1*]; JORGE ÁNGEL ULLÉ[2]; ADRIÁN ENRIQUE ANDRIULO[1]

Recibido: 02/12/2019
Recibido con revisiones: 12/03/2020
Aceptado: 12/03/2020

## RESUMEN

Los suelos bajo producción hortícola/florícola presentan, generalmente, elevada degradación. La aplicación de biochar está mencionada como una alternativa para mitigar la degradación de los suelos y el cambio global. En Argentina su estudio y utilización son incipientes. Los objetivos del trabajo fueron evaluar en un Argiudol vértico con producción de batata bajo manejo agroecológico: a) el efecto acumulado de tres aplicaciones anuales de biochar entre 2013 y 2015 (producido a partir de *Aspidosperma quebracho-blanco*), 30 Mg ha$^{-1}$ en total, sobre algunas propiedades edáficas, dos años y medio posteriores a su última aplicación, y b) el cambio absoluto, para el periodo 2012-2018, en algunas propiedades superficiales del suelo con y sin biochar. La aplicación de biochar incrementó las reservas de carbono orgánico del suelo (COS) y el pH del espesor 0-30 cm. Disminuyó las reservas de nitrógeno orgánico del suelo (NOS) y aumentó la relación C/N del espesor 0-20 cm. Aumentó levemente la conductividad eléctrica del espesor 0-5 cm y no modificó la capacidad de intercambio catiónico. Tampoco afectó la infiltración y la capacidad de agua útil del espesor 0-30 cm. Sin embargo, se observó un aumento muy marcado en la humedad actual y en la disponibilidad de agua útil de los espesores 10-20 y 5-10 cm, respectivamente. Cuando se analizó el cambio neto, se observó el mismo efecto para COS y pH. Para las variables físicas, las condiciones edafoclimáticas al momento de muestreo (menor humedad actual en 2018) tuvieron un mayor efecto que el del biochar. Dejando de lado su efecto directo sobre el aumento de COS y la reducción superficial de la densidad aparente, las interacciones entre el biochar y el suelo aún requieren estudio.

**Palabras clave:** pirólisis, enmienda rica en carbono, restauración edáfica.

# BIOCHAR APPLICATION IN A DEGRADED SOIL UNDER SWEET-POTATO PRODUCTION. EFFECT ON EDAPHIC PROPERTIES

## ABSTRACT

In general, soils under horticultural/floricultural production systems present high degradation. Biochar application is mentioned as an alternative to mitigate soil degradation and global change. In Argentina its study and use are incipient. In a Vertic Argiudoll, in a sweet potato production system under a agroecological management, the objectives of this work were to evaluate: a) the cumulative effect of three annual biochar applications, of 30 Mg ha$^{-1}$ in total, between 2013 and 2015 (from *Aspidosperma quebracho-blanco* feedstock), over some soil properties, two and a half years after its last application, and b) the net change, for the 2012-2018 period, in some soil properties with and without biochar applications. Biochar application increased the soil organic carbon reserves (SOC) and pH of the 0-30 cm soil thickness. It decreased the soil organic nitrogen reserves (SON) and increased the C/N ratio of the 0-20 cm soil thickness. Besides, it slightly increased the electrical conductivity of the 0-5 cm soil thickness and did not change the cationic exchange capacity. It also did not affect the water infiltration and the water holding capacity of the 0-30 cm soil thickness. However, a very marked increase in the moisture content and in the current water availability of the 10-20 and 5-10 cm soil thicknesses, respectively, were observed. When the absolute change was analyzed, the same effect was observed for SOC and pH. For physical variables, edaphoclimatic conditions at sampling moment (lower moisture content in 2018) had a greater effect than the biochar. Leaving aside its direct effect on the SOC increase and the superficial bulk density reduction, the interactions biochar-soil still require study.

**Key words:** pyrolysis, amendment rich in carbon, edaphic restoration.

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, EEA Pergamino, Ruta 32 km 4.5, Pergamino, Buenos Aires.
2 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, EEA San Pedro, Ruta Nacional 9 km 170, San Pedro, Buenos Aires.
Autor de contacto: milesi.luis@inta.gob.ar

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

## INTRODUCCIÓN

Recientemente, la Asamblea General de las Naciones Unidas declaró al próximo decenio como el de la restauración de los ecosistemas. Esta declaración tiene como objetivo promover la restauración de los ecosistemas degradados para combatir la crisis climática y mejorar la seguridad alimentaria, el suministro de agua y la biodiversidad (UN, 2019). El uso de biochar en suelos constituye una de las soluciones para mitigar el cambio climático y restaurar ecosistemas, por su efecto sobre el secuestro de carbono en el suelo y su elevada persistencia (Lehmann *et al.,* 2006). El biochar es una enmienda rica en carbono estable y de baja mineralización, resultante de la descomposición térmica de material orgánico a temperaturas entre 400 y 700 ºC, en ausencia de oxígeno (Lehmann & Joseph, 2009). Diferentes trabajos que analizan alternativas para la adaptación y mitigación del cambio global (*i.e.*forestación, manejo y uso de la tierra, geoingeniería), destacan el potencial del biochar para este fin. Sin embargo, resaltan que sus efectos fuera del ámbito de la investigación aún resultan difusos (Griscom *et al.*, 2017) y requieren de mayor investigación y desarrollo (Cusack *et al.,* 2014).

En Argentina, los suelos bajo producción hortícola/florícola, generalmente, presentan elevada degradación (PNHFA, 2018). El manejo intensivo con riego, fertilizaciones y labranzas permanentes conduce a la pérdida de materia orgánica y de fertilidad física, a la sodicidad, a la salinidad (Andreau *et al.,* 2012; Cuellas, 2017; Paladino *et al.,* 2018) y a la presencia de plaguicidas en el suelo (Andrade *et al.*, 2005; DP y UNLP, 2015; Mac Loughlin *et al.,* 2017). En la región norte de la Provincia de Buenos Aires, el cultivo de batata (*Ipomoea batatas*) se practica sobre Argiudoles vérticos en un área de aproximadamente 1500 ha, alrededor del partido de San Pedro. El manejo habitual consiste en la ejecución de labranzas sobre suelo desnudo para favorecer las operaciones de trasplante y de remociones profundas en el periodo de cosecha. Su tendencia al monocultivo ha provocado una caída brusca de materia orgánica y propiedades edáficas asociadas (Ullé *et al.*, 2014; PNHFA, 2018). Sasal *et al.* (2000) encontraron que en los sistemas intensivos de producción hortícola de dicha área es imprescindible la adición de fuentes de carbono orgánico para la reversión de la degradación. En otro trabajo, Ullé (2013) establecieron que para conservar los suelos bajo producción hortícola de manera sustentable es necesario rediseñar y planificar los cultivos hortícolas con manejo agroecológico y, para ello, es necesario realizar un monitoreo de propiedades físicas, química y biológicas del suelo, de modo integral. Estas problemáticas hacen que resulte prioritario buscar alternativas mitigadoras de la degradación del suelo antes de alcanzar puntos irreversibles (Walker & Salt, 2006). La conversión de materias primas orgánicas disponibles localmente (*i.e.* residuos agrícolas) a biochar puede ser una alternativa importante en los sistemas agrícolas de pequeños productores. Sin embargo, si bien su utilización puede resultar sostenible en la producción hortícola, no hay suficiente investigación para proporcionar información específica sobre sus efectos dirigidos a estos cultivos (Cox, 2012). Respecto al cultivo de batata, cuando se aplica biochar en suelos de muy baja fertilidad y sin acompañamiento de fertilizantes minerales, el efecto sobre la producción total de raíces tuberosas es desde poco marcado a moderado (Walter & Rajashekhar Rao, 2015; Jin *et al.,* 2019) en comparación a cuando se lo aplica acompañado de fertilizantes minerales (Liu *et al.*, 2014; Walter & Rajashekhar Rao, 2015; Indawan *et al.,* 2018). Como una consecuencia, el uso de biochar incrementa la humedad edáfica con respecto a la no aplicación mientras que cuando se lo utiliza con fertilizantes minerales hay una reducción de la misma debido al aumento en la productividad (Walter & Rajashekhar Rao, 2015). Estos efectos son directamente proporcionales a las dosis empleadas y tienden a perderse en el mediano plazo (Jint *et al.,* 2019).

Generalmente, se informa que la aplicación de biochar mejora el secuestro de carbono del suelo y proporciona otros beneficios para la productividad del suelo, como la reducción de la densidad aparente, la mejora de la capacidad de retención de agua y nutrientes, la estabilización de la materia orgánica del suelo, la mejora de la actividad microbiana y el secuestro de me-

tales pesados y plaguicidas (Downie *et al.* 2009). Si bien estos beneficios y oportunidades resultan atractivos, quedan por resolver varias cuestiones antes que su producción y uso se generalice (entre los más importantes: materia prima utilizada, condiciones de pirólisis, interacción biochar-suelo). El estado actual del conocimiento se basa principalmente en estudios limitados a pequeña escala y en condiciones de laboratorio y/o invernadero (Nair *et al.,* 2017). Las propiedades del biochar dependen tanto de la materia prima utilizada como del método y de las condiciones de pirólisis (Downie & Crosky, 2009). Su efecto varía tanto con las dosis (Jeffry *et al.,* 2011), que generalmente oscilan entre 10 y 40 Mg $ha^{-1}$, como con la distribución del tamaño de partícula utilizada (International Biochar Initiative, 2012).

En Argentina, hasta el momento, su estudio y utilización son muy incipientes. Los objetivos del presente trabajo fueron evaluar en un monocultivo de batata:

a) el efecto acumulado de tres aplicaciones anuales de biochar sobre algunas propiedades edáficas, dos años y medio posteriores a su última aplicación, y

b) el cambio absoluto para el periodo 2012-2018 en algunas propiedades superficiales del suelo con y sin biochar.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio de estudio

El estudio se realizó en un ensayo de larga duración (ELD) de producción de batata (*Ipomoea batatas cv Arapey*) bajo manejo agroecológico ubicado en la Estación Experimental (EEA) San Pedro (33º44,05'33"S 59º47'56,22"O) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (INTA-EMBRAPA, 2011). El ELD se encuentra en un suelo Arguidol vértico de la serie Ramallo. Es un suelo oscuro, pesado, muy profundo y moderadamente bien drenado, que domina los planos altos próximos a la rivera del Paraná. La pendiente general no supera el 0,5%. El horizonte superficial es medianamente ácido, se extiende hasta 0,25-0,30 m y tiene textura franco arcillo-limosa. La transición hacia el horizonte Bt1, es gradual y suave. Este horizonte es de textura arcillosa (58% de arcilla) y de gran espesor, con estructura prismática fuerte. La temperatura y la precipitación media anual son de 16,8ºC y 940 mm, respectivamente (INTA, 1978).

### Experimento a campo

El ELD se inició en 2011, presenta diseño en bloques completos al azar (bloques = 3) con 12 tratamientos. Para este estudio se seleccionaron dos tratamientos: monocultivo de batata y secuencia mucuna (*Mucuna cinza*)-batata. En este último, sólo se realizó mucuna en la campaña 2011-2012 y se discontinuó su cultivo para recibir las aplicaciones de biochar. La elección del dicho experimento radicó en que el suelo presentaba una elevada pérdida de COS y un estado estructural inestable en el horizonte superficial (datos no mostrados).

La producción de batata demanda un gran número de labranzas con diferente intensidad y profundidad durante todo su ciclo de cultivo. Primero, se realizan las labranzas de preparación del sitio y armado de camellones para el trasplante. Las mismas consisten en triturado de vegetación espontanea, laboreo primario con cincel (hasta ~20 cm de profundidad) y dos operaciones de rastra excéntrica, dos meses antes del trasplante (10-12 cm de profundidad), para la confección de los camellones. Segundo, durante el desarrollo del cultivo se realizan laboreos para el control de malezas. Tercero, la cosecha de la batata se realiza con arado de reja y vertedera que produce la inversión completa del espesor 0-30 cm con la finalidad de exponer las raíces tuberosas.

La aplicación del biochar se realizó de forma superficial durante tres años consecutivos, entre 2013 y 2015, inmediatamente anterior a las operaciones de rastra excéntrica para lograr su incorporación. Se aplicaron 10 Mg biochar $ha^{-1}$ $año^{-1}$. De esta manera, se aseguró que los cinco ciclos de cultivo siguientes fueran suficientes para lograr una distribución homogénea de la enmienda en el espesor 0-30 cm.

### Biochar

Como fuente de biochar se utilizó residuo de la producción, procesamiento y almacenamiento

de la industria del carbón vegetal. El mismo fue obtenido mediante pirólisis lenta de *Aspidosperma quebracho-blanco* en hornos del tipo "media naranja" en la provincia de Santiago del Estero. El proceso se inicia quemando parte del material en presencia de oxígeno, para producir el incremento de la temperatura. Luego, se sella el horno y una vez consumido el oxígeno remanente se inicia la pirólisis. Los subproductos vaporosos y gases se liberan a la atmósfera en forma de humo y son los responsables de generar la presión positiva para impedir el ingreso de oxígeno. La tasa de aumento de la temperatura es muy baja, la temperatura de pirólisis varía entre 400 y 500°C y el tiempo de proceso es de entre 11 y 15 días (De Bedia *et al.,* 2016). Las características del biochar utilizado se muestran en la **Tabla 1**.

## Muestreo de suelos y determinaciones

Para evitar los efectos de laboreo sobre las variables físicas, los muestreos de suelo se realizaron, cuatro meses después de la última labor. En noviembre de 2012 en el espesor 0-10 cm y en diciembre de 2018 en los espesores 0-5, 5-10, 10-20 y 20-30 cm.

Las propiedades edáficas analizadas fueron:

Químicas: carbono orgánico del suelo (COS) por combustión seca con analizador elemental (Nelson & Sommers, 1996) y nitrógeno total (NOS), solo en 2018, por método semicro-Kjeldahl (Bremner & Mulvaney, 1982).

Físico-químicas: pH y conductividad eléctrica (CE), por potenciometría con relación suelo: agua 1:2.5, capacidad de intercambio catiónico (CIC), por el método Soil Survey Laboratory Staff (1992).

Físicas: densidad aparente (DAP) por el método del cilindro (Burke *et al.*, 1986). Punto de marchitez permanente (PMP) sobre placa extractora por presión de Richards a -1500 kPa (Richards, 1928). Capacidad de campo (CC) a -20 kPa y distribución del tamaño de poros utilizando mesa de tensión con placa de yeso (Bezerra de Oliveira, 1968; Hillel 1980). Humedad al momento muestreo (*Hactual*) por secado en estufa a 105ºC.

Los cilindros extraídos fueron llevados al laboratorio y pesados. Luego, se saturaron al vacío por ascenso capilar durante 24h y se pesaron. Inmediatamente después, fueron transferidos a una mesa de tensión con placa de yeso, registrando su peso a las tensiones de -1, -5, -10 y -20 kPa. Seguidamente, se llevaron a estufa a 105ºC hasta peso constante. Por último, se calculó la DAP y por diferencia con el peso de los cilindros extraídos (antes de la saturación) se obtuvo Hactual.

Mediante las diferencias de peso entre saturación y cada tensión se obtuvieron los tama-

**Tabla 1.** Características químicas y fisicoquímicas y distribución del tamaño de partícula del biochar.

**Table 1.** Chemical and physicochemical characteristics and particle size distributions of the biochar.

| Químicas | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| C | N | C/N | P | S | Cenizas |
| % | | | (mg $kg^{-1}$) | | % |
| 63,95 | 1,03 | 61,8 | 645,1 | 0,198 | 4,1 |
| Fisicoquímicas | | | Distribución de tamaño de partículas | | |
| $pH^{(1:10)}$ | $CE^{(1:10)}$ | CIC | <2 mm | 2-8 mm | >8 mm |
| | dS $m^{-1}$ | cmol $kg^{-1}$ | | % | |
| 8,45 | 2,04 | 13,72 | 34 | 55 | 11 |

**C: carbono.** N: nitrógeno. C/N: relación carbono/nitrógeno. P: Fósforo. S: Azufre. CE: conductividad eléctrica. CIC: capacidad de intercambio catiónico.
**C: carbon.** N: nitrogen. C/N: carbon/nitrogen ratio. P: phosphorus. S: sulfur. CE: electrical conductivity. CIC: cationic exchange capacity.

ños de poros. Estos se clasificaron como macroporos (60-300 $\mu$m, -Ma60-300- y >300 $\mu$m -Ma>300-), mesoporos (15-30 $\mu$m -Me15-30- y 30-60 $\mu$m -Me30-60-) y microporos (<15 $\mu$m de diámetro -Mi<15-) (Hillel 1980).

La DAP se utilizó para transformar el contenido gravimétrico de agua a CC, PMP y Hactual a contenido volumétrico. La capacidad de agua útil (CAU) (1) y la disponibilidad de agua útil (DAU) (2) volumétrica de cada uno de los espesores considerados se calcularon utilizando las siguientes fórmulas:

$$\boldsymbol{CAU = \sum_1^n (CC - PMP) x\, DAP} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{DAU = \sum_1^n (Hactual - PMP) x\, DAP} \quad (2)$$

donde CC es el agua gravimétrica a una tensión de -20kPa (%), Hactual es el agua gravimétrica en el momento de muestreo (%), PMP es el agua gravimétrica a una tensión de -1500 kPa (%) y DAP es la densidad aparente (Mg $m^{-3}$).

En los mismos momentos de muestreo se determinó la infiltración básica (Ib), utilizando permeámetros de disco para caracterizar las tasas de infiltración en estado estacionario (Ib) a 0 cm de tensión (Ankeny, 1992). Se realizaron dos infiltraciones por unidad experimental cerca de los sitios de muestreo. Las lecturas se realizaron cada 5 minutos durante 90 minutos.

En 2018, para eliminar el efecto de la DAP sobre las reservas de COS y NOS, las mismas se expresaron a igual masa de suelo considerando dos espesores (0-20 y 0-30 cm), eligiendo la menor masa de suelo obtenida del conjunto de datos del período completo (2200 Mg $ha^{-1}$ y 3700 Mg $ha^{-1}$, respectivamente).

La producción de raíces tuberosas presentó elevada variabilidad entre años y, especialmente, dentro del tratamiento con biochar. Su valor promedio general fue 11,7 ± 9 Mg $ha^{-1}$.

### Análisis estadísticos

El análisis estadístico en 2018 se realizó mediante análisis de la varianza y se utilizó el test DGC (Di Rienzo, *et al.,* 2002) para comparar las medias cuando hubo efecto de tratamiento mientras que el cambio absoluto entre 2012 y 2018 se analizó mediante Prueba t. Los análisis se realizaron con el software Infostat (Di Rienzo *et al.,* 2008) y se consideró un p-valor igual o menor a 0,10.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Distribución y reservas de C y N

Luego de dos años y medio de la última aplicación de biochar, todos los horizontes analizados mostraron enriquecimiento en COS, evidenciando que el itinerario de aplicación diseñado resultó apropiado. Sin embargo, la concentración de NOS disminuyó en los espesores 0-5 y 10-20 cm. Estos dos resultados condujeron a un aumento marcado en la relación C/N hasta los 20 cm de profundidad (**Figura 1**).

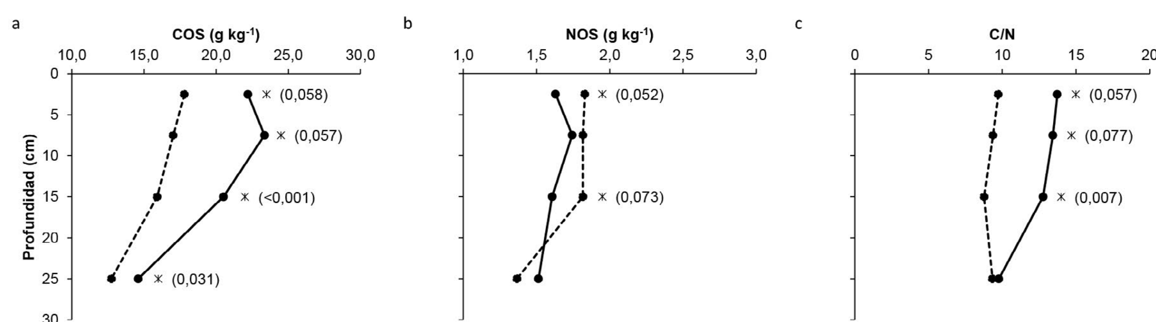



**Figura 1.** Distribución de las concentraciones de carbono (a) y nitrógeno (b) orgánico del suelo (COS y NOS, respectivamente) y de la relación de C/N (c) en los tratamientos con (línea negra) y sin biochar (línea puenteada) del espesor 0-30 cm. (*) indica diferencia estadística significativa entre tratamientos para el mismo espesor. Entre paréntesis se muestra el p-valor.

**Figure 1.** Soil organic carbon (a) and nitrogen (b) (COS and NOS, respectively) and C/N ratio (c) distribution in the treatment with (full line) or without biochar (dotted line) of the 0-30 cm thickness. (*) indicates significant statistical differences between treatments in the same thickness. The p-value is between brackets.

El aumento estimado en las reservas de COS para una masa de suelo de 3700 Mg $ha^{-1}$ fue de 13,7 Mg COS $ha^{-1}$. Este aumento representa el 71% de la cantidad de C aplicado (19 Mg C $ha^{-1}$). Por otro lado, las reservas de NOS disminuyeron 0,38 Mg $ha^{-1}$ para una masa de suelo de 2200 Mg $ha^{-1}$ (**Figura 2**).

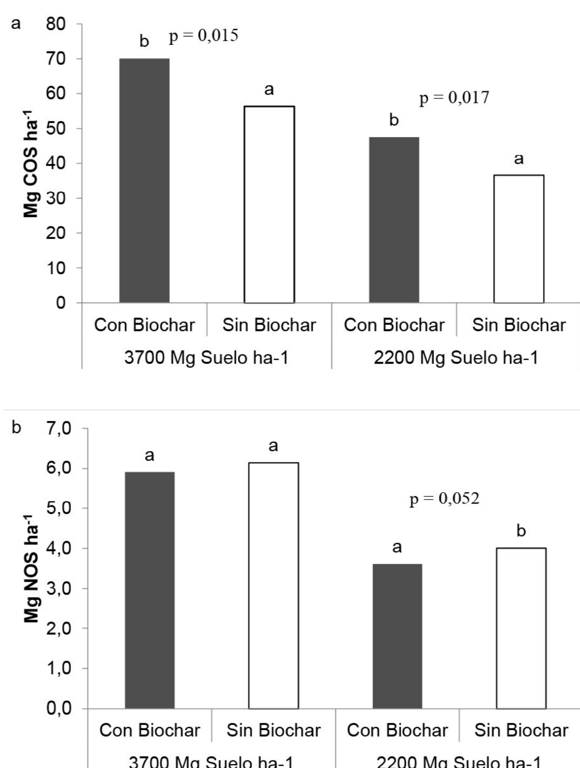



**Figura 2.** Reservas de carbono (a) y nitrógeno (b) orgánicos del suelo (COS y NOS, respectivamente) en los tratamientos con (barras rellenas) y sin biochar (barras vacías) referidas a 3700 y 2200 Mg de suelo ha-1. (*) indica diferencia estadística significativa entre tratamientos. Entre paréntesis se muestra el p-valor.

**Figure 2.** Soil organic carbon (a) and nitrogen (b) reserves (COS and NOS, respectively) in the treatment with (full bars) or without (blank bars) biochar at 3700 and 2200 Mg soil ha-1. (*) indicates significant statistical differences between treatments. The p-value is between brackets.

Los resultados no dejan duda con respecto a la estabilidad de la enmienda utilizada y su efecto sobre el COS, hecho que lo habilita para su uso futuro como compensador de carbono. Sin embargo, ello no debería generalizarse para cualquier tipo de biochar ya que depende también de los otros elementos que lo constituyen, particularmente nitrógeno. El valor nutricional del biochar depende de la dosis, de su contenido en nutrientes y de su interacción con el suelo (Nguyen *et al.,* 2010; Zimmerman, 2010; Keith & Singh, 2011). Se ha demostrado que la disponibilidad de N del biochar varía ampliamente según la temperatura de pirólisis, la velocidad de calentamiento, la duración del plateau a temperatura máxima y el tipo de materia prima (Joseph *et al.,* 2010). Recientemente, se señaló que el efecto de la aplicación sobre las emisiones de $N_2O$ y la nitrificación bruta del suelo está en pleno debate (Keiblinger *et al.,* 2018). Los resultados respecto de los cambios en el contenido de N-$NH_4^+$ post-aplicación de biochar y los procesos de adsorción y desorción son muy contradictorios e indican la falta de comprensión de los procesos involucrados (Wang *et al.,* 2015). En el presente estudio se aplicaron alrededor de 100 kg N $ha^{-1}$ en cada una de las tres oportunidades y, si bien su relación C/N elevada lo ubicaba como una causa de privación temporaria de N disponible para las plantas (elevada inmovilización bruta), posiblemente, estimuló la pérdida de NOS. Es decir que, si bien el biochar provino de materia prima vegetal, con concentraciones en nutrientes bastante menores que las de cualquier biochar de residuos de origen animal (Gaskin *et al.*, 2008; Amonette & Joseph, 2009), la disponibilidad de N habría resultado elevada. Como el biochar no tuvo impacto sobre la productividad de batata, no puede descartarse que el N mineralizado se haya perdido desde el suelo via lixiviación y/o denitrificación.

## Propiedades fisicoquímicas

Debido a la alcalinidad propia de la enmienda, el pH del suelo aumentó en todos los espesores, excepto en 10-20 cm el cual mostró tendencia al aumento ($p = 0,11$). El aumento promedio fue de 0,35 unidades (**Figura 3**). Este incremento, estuvo acompañado por un pequeño aumento de la CE en el espesor 0-5 cm ($p = 0,094$). Por otro lado, no se detectaron diferencias en la CIC para ningún espesor (**Figura 3**).

La magnitud del aumento de pH siguiendo la aplicación de biochar resultó característico de suelos de clima templado con textura similar, demostrando una relativamente elevada capacidad buffer de estos suelos frente al agregado de biochar derivado de árboles (Streubel *et al.,*

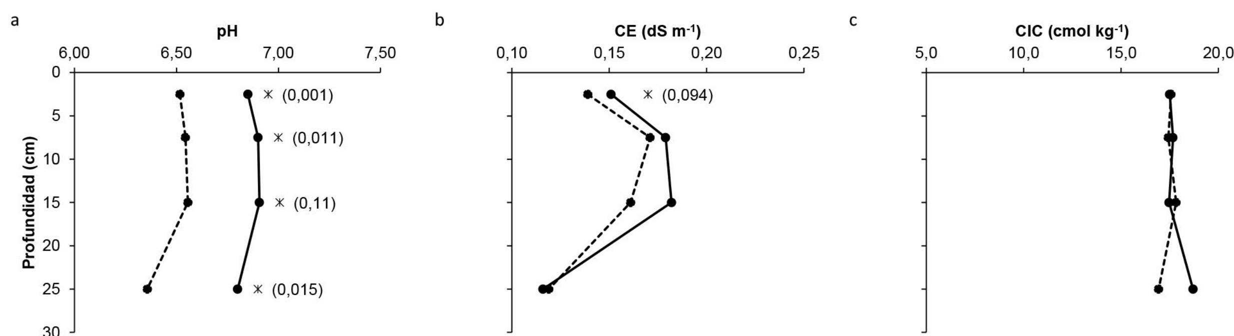



**Figura 3.** Distribución del pH, la conductividad eléctrica (CE) y de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en los tratamientos con (línea negra) y sin biochar (línea puenteada) del espesor 0-30 cm. (*) indica diferencia estadística significativa entre tratamientos para el mismo espesor. Entre paréntesis se muestra el p-valor.

**Figure 3.** pH, electrical conductivity (CE) and cationic exchange capacity (CIC) distribution in the treatments with (full line) or without biochar (dotted line) for the 0-30 cm. (*) indicates significant statistical difference between treatments in the same thickness. The p-value is between brackets.

2011). La alcalinidad del biochar utilizado puede proporcionar algunos beneficios en la neutralización de suelos ligeramente ácidos como el analizado. El bajo contenido de cenizas del biochar (**Tabla 1**) explicó el pequeño cambio en el contenido de sales en la superficie del suelo. Los biochar producidos a partir de madera presentan menor contenido de cenizas que los producidos a partir de especies herbáceas, estiércoles y biosólidos (Cox, 2012; Singh *et al.,* 2014; Smider & Singh, 2014). El hecho de no haberse encontrado efecto sobre la CIC, podría enmarcarse bajo dos hipótesis: a) el biochar utilizado tuvo una CIC menor a la del suelo donde se lo aplicó (13,7 vs 17,7 cmol $kg^{-1}$) y/o b) es probable que todavía no haya pasado el tiempo suficiente como para que el biochar oxide sus superficies y aumente la CIC (Liang *et al.,* 2006; Cheng *et al.,* 2008).

## Propiedades físicas

En la **Tabla 2** se presentan los resultados para las propiedades físicas.

Los valores medios de DAP de los espesores 0-5 y 20-30 cm con biochar fueron un 5% más bajo y más alto que los de sin biochar, respectivamente. Con biochar, esto fue acompañado de un aumento en los Me15-30 y una reducción de los Ma>300 para los mismos horizontes, respectivamente. Además, si bien no se detectó efecto en la DAP a 10-20 cm, con biochar hubo un menor volumen de Me30-60. Esta reducción en los Me30-60 tiene un peso relativo muy pequeño en la porosidad total del espesor. Además, a pesar que no se encontraron diferencias significativas para Mi<15 (porosidad responsable de la CC), se registró un aumento significativo en la CC gravimétrica de dicho espesor con biochar (28,2 vs.

**Tabla 2.** Densidad aparente (DAP) y distribución de macro (>300µm y 60-300 µm), meso (30-60 µm y 15-30 µm) y microporos (<15µm) en los tratamientos con y sin biochar en el espesor 0-30 cm.

**Table 2.** Bulk density (DAP) and macro (>300µm and 60-300 µm), meso (30-60 µm and 15-30 µm) and micropores (<15µm) distribution in the treatments with or without biochar for the 0-30 cm thickness.

| Prof | DAP | | p | Ma>300 | | p | Ma60-300 | | p | Me30-60 | | p | Me15-30 | | p | Mi<15 | | p |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | con | sin | | con | sin | | con | sin | | con | sin | | con | sin | | con | sin | |
| cm | Mg $m^{-3}$ | | | | | | | | | % | | | | | | | | |
| 0-5 | 1,01 | 1,05 | 0,06 | 9,6 | 10,8 | ns | 6,5 | 6,1 | ns | 4,0 | 3,4 | ns | 4,9 | 3,6 | 0,07 | 36,1 | 35,5 | ns |
| 5-10 | 1,09 | 1,12 | ns | 14,6 | 13,0 | ns | 5,4 | 5,6 | ns | 2,2 | 2,5 | ns | 2,4 | 2,0 | ns | 33,6 | 34,0 | ns |
| 10-20 | 1,26 | 1,31 | ns | 9,0 | 7,1 | ns | 3,3 | 3,7 | ns | 1,9 | 2,4 | 0,08 | 2,0 | 1,8 | ns | 35,5 | 34,7 | ns |
| 20-30 | 1,44 | 1,38 | 0,003 | 5,0 | 7,1 | 0,03 | 2,1 | 2,4 | ns | 1,1 | 1,7 | ns | 1,4 | 1,3 | ns | 35,3 | 34,3 | ns |

Prof: profundidad. p: p-valor. ns: diferencia estadística no significativa.
Prof: depth. p: p-value. ns: non-significant statistical difference.

26,5 %, p = 0,099, datos no mostrados). Esto se debe a la compensación que genera la DAP cuando se transforma la humedad gravimétrica en volumétrica.

Los valores medios de DAP, de macro y mesoporos encontrados para el espesor 0-10 cm en ambos tratamientos dan cuenta de una estructura con elevada porosidad estructural (24%) mientras que en los espesores inferiores, la porosidad disminuye marcadamente (13,5%). Una explicación para estos resultados está dada por el sistema de labranzas característico de este agroecosistema. Para la extracción de las raíces tuberosas se produce una inversión completa del espesor 0-30 cm que es acompañada, varios meses después, por laboreos sin inversión de menor profundidad. Se sabe que las labores mecánicas abren la estructura del suelo en su profundidad de acción y la compactan por debajo (Baver *et al.,* 1972). Por otro lado, como el biochar tiende a ser un producto de baja densidad, de antemano se espera que su aplicación al suelo reduzca la DAP por el aumento de su porosidad interna (Downie *et al.*, 2009). Sin embargo, esto se ha informado para estudios de campo con dosis mayores a 30 Mg $ha^{-1}$ e incorporación en los primeros 10 cm. Solo en estos casos los cambios en la densidad aparente superan al error de la técnica de medición (Zhang *et al.,* 2010).

Ninguno de los tratamientos presentó cambios en las constantes hídricas CC y PMP volumétricas (**Tabla 3**). En consecuencia, tampoco afectó la CAU a 0-30 cm. Bayabil *et al.* (2015) mostraron resultados similares en suelos con tendencia a textura fina. El efecto reportado del biochar sobre la CAU también estaría relacionado con las propiedades del biochar y el tipo de suelo. Streubel *et al.* (2011) reportaron que en suelos franco limosos de clima templado los biochar derivados de cama de pollo decrecieron la CAU, los derivados de cáscara de pecán o de maní la aumentaron muy poco y los derivados de pasto elefante la aumentaron un 16%. En concordancia con nuestros resultados, Busscher *et al.* (2010) no encontraron cambios significativos en CAU usando biochar de cáscara de pecán (~11 Mg $ha^{-1}$) en suelos francos, aunque especularon que con dosis más altas podrían haberla aumentado.

El tamaño de partículas del biochar utilizado es otro factor a tener en cuenta en la interpretación de estos resultados. Glab *et al.* (2016) encontraron que el contenido de agua disponible disminuyó con un aumento en el tamaño del biochar de 0,5 a 2 mm. Debido a que las partículas pequeñas de biochar tienen, generalmente, más microporos que las grandes, éstas podrían retener el agua con mayor fuerza y así tener mayor CAU que las partículas grandes. El biochar utilizado en el presente trabajo tuvo un 66% de las partículas mayores de 2 mm. Ello podría justificar que no se hayan obtenido efectos de su interacción con el suelo sobre la CAU.

Por otro lado, con biochar se registró un aumento del 23% en la Hactual del espesor 10-20 cm y del 148% en la DAU del espesor 5-10 cm con respecto a sin biochar, sin afectar los espesores restantes. Evidentemente, si bien el biochar no afectó en este estudio la CAU, podría

**Tabla 3.** Humedad volumétrica a capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), humedad actual (H actual) y disponibilidad de agua útil (DAU) en los tratamientos con y sin biochar para el espesor 0-30 cm.

**Table 3.** Volumetric moisture at field capacity (CC), permanent wilting point (PMP), current moisture (H actual) and current water availability in the treatments with or without biochar for the 0-30 cm thickness.

| Prof | CC | | p | PMP | | p | H actual | | p | DAU | | p |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | con | sin | | con | sin | | con | sin | | con | sin | |
| cm | $m^3 m^{-3}$ | | | $m^3 m^{-3}$ | | | $m^3 m^{-3}$ | | | $m^3 m^{-3}$ | | |
| 0-5 | 0,361 | 0,354 | ns | 0,111 | 0,113 | ns | 0,105 | 0,074 | ns | 0,015 | 0,000 | ns |
| 5-10 | 0,336 | 0,340 | ns | 0,131 | 0,139 | ns | 0,212 | 0,172 | ns | 0,080 | 0,032 | 0,10 |
| 10-20 | 0,355 | 0,347 | ns | 0,164 | 0,161 | ns | 0,277 | 0,225 | 0,10 | 0,113 | 0,065 | ns |
| 20-30 | 0,354 | 0,341 | ns | 0,178 | 0,165 | ns | 0,301 | 0,274 | ns | 0,124 | 0,109 | ns |

Prof: profundidad. p: p-valor. ns: diferencia estadística no significativa.
Prof: depth. p: p-value. ns: non-significant statistical difference.

estar modificando su dinámica. Es probable que el horizonte 10-20 cm haya tenido también una mayor Hactual al momento de los laboreos y haya potenciado el impacto intrínseco de las labranzas en el espesor más profundo, aumentando su DAP.

Con respecto a Ib, no se observaron diferencias entre tratamientos (**Tabla 4**). Los resultados concuerdan con los de Blanco-Canqui (2017) quienes observaron que en suelos de textura y dosis de biochar similares a las de este trabajo no presentaron diferencias en Ib entre tratamientos. Es probable que sea necesario aplicar dosis más elevadas de biochar para poder visualizar un efecto sobre Ib.

## Cambio absoluto en algunas propiedades edáficas superficiales

El valor medio del contenido de COS en 2012 es un 67% del informado para la serie Ramallo en la carta de suelo de INTA (INTA, 1978) y es característico de los contenidos actuales para la misma serie de suelos en la EEA San Pedro (Gonzalez *et al.,* 2013).

La comparación de las propiedades edáficas analizadas en el espesor 0-10 cm en cada tratamiento permite discriminar el efecto del momento de muestreo del de la enmienda (**Tabla 4**). Si bien los muestreos se realizaron respetando el tiempo desde la última labor (cuatro meses), los valores medios de las propiedades en 2012 y 2018 para ambos tratamientos estuvieron afectados por las condiciones edafoclimáticas del momento de muestreo, situación reflejada en la Hactual. Así, sin biochar, se comprobó que la estructura del suelo en 2018 tenía más mesoporos, más macroporos de 60-300 $\mu$m y menor Hactual, los cuales explicaron la mayor Ib. La aplicación de biochar no modificó dicha tendencia.

Al inicio de este trabajo se esperaba que el biochar produjera un aumento de las propiedades de superficie del suelo. Los cambios observados en COS y pH no son sorprendentes (Atkinson *et al.,* 2010). Además, si bien se encontró un aumento de la humedad disponible atribuida a la presencia de biochar, ni la CIC ni las constantes hídricas ni el ingreso de agua al suelo fueron afectadas. Es probable que se necesite más tiempo para que el biochar aplicado continúe su transformación bioquímica para aumentar su integración con la matriz del suelo.

**Tabla 4.** Cambio neto en el carbono orgánico del suelo (COS), pH, conductividad eléctrica (CE), densidad aparente (DAP), distribución de macro (>300µm y 60-300 µm), meso (30-60 µm y 15-30 µm) y microporos (<15µm, humedad actual (H actual) e infiltración básica (Ib) del espesor 0-10 cm tratadas con y sin biochar.

**Table 4.** Net change of soil organic carbon (COS) pH, electrical conductivity (CE), bulk density (DAP), macro (>300µm and 60-300 µm), meso (30-60 µm and 15-30 µm) and micropores (<15µm) distribution, current moisture (H actual) and basic infiltration (Ib) in the 0-10 cm thickness treated with or without biochar.

| | | Con biochar | | | Sin biochar | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Variable** | **Unidad** | **2012** | **2018** | **p** | **2012** | **2018** | **p** |
| COS | g kg$^{-1}$ | 16,58 | 23,88 | 0,015 | 16,58 | 18,89 | 0,125 |
| pH | | 6,55 | 6,88 | 0,003 | 6,55 | 6,53 | ns |
| CE | dS m$^{-}$1 | 0,17 | 0,17 | ns | 0,17 | 0,16 | ns |
| DAP | Mg m$^{-3}$ | 1,18 | 1,2 | ns | 1,18 | 1,21 | ns |
| Ma>300 | | 12,5 | 9,53 | 0,066 | 12,5 | 9,5 | 0,069 |
| Ma60-300 | | 2,95 | 4,33 | 0,003 | 2,95 | 4,43 | 0,053 |
| Me30-60 | % | 1,8 | 2,3 | 0,103 | 1,8 | 2,47 | 0,058 |
| Me15-30 | | 2,69 | 2,64 | ns | 2,69 | 2,17 | 0,036 |
| Mi <15 | | 34,84 | 35,1 | ns | 34,84 | 34,6 | ns |
| H actual | m$^{3}$ m$^{-3}$ | 0,283 | 0,179 | 0,016 | 0,283 | 0,136 | <0,001 |
| Ib | cm h$^{-1}$ | 3,64 | 7,47 | 0,005 | 3,64 | 8,11 | <0,001 |

p: p-valor. ns: diferencia estadística no significativa.
p: p-value. ns: non-significant statistical difference.

## CONCLUSIONES

En este trabajo, dejando de lado los efectos directos de la aplicación de biochar (aumento de C y reducción de la densidad aparente superficial), las interacciones entre el biochar y el suelo están aún lejos de ser entendidas e impiden concluir sobre la dinámica y la retención de nitrógeno y agua.

En cuanto a su ajuste agronómico para su uso en este tipo de sistema productivo, las aplicaciones consecutivas constituyen una buena alternativa para homogenizar la distribución de la enmienda en la profundidad de laboreo. Por otro lado, el pH del suelo resultó un indicador clave para conocer su distribución en el suelo.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se llevó a cabo con fondos de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT 2015-3425) y el Programa Nacional Suelo y la Red de Agroecología de INTA (cartera 2013-2018). Se agradece a los agrónomos D. Colombini y a F. Villalba por el trabajo de campo.

## BIBLIOGRAFÍA

Amonette, JE & S Joseph. 2009. Characteristics of biochar: microchemical properties. In Lehmann J & S Joseph (Eds). Biochar for environmental management: science and technology. Earthscan.

Andrade, ML; ML Reyzábal; EF Covelo & FA Vega. 2005. Organochlorine pesticides in soils of the horticultural belt of Bahía Blanca (Argentina). Can J Soil Sci 85: 273–282.

Atkinson, CJ; JD Fitzgerald & NA Hipps. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. Plant Soil 337 (1-2): 1–18.

Ankeny, MD. 1992. Methods and theory for unconfined infiltration measurements. In: Topp, GC; WY Reynolds & RD Green (Eds). Advances in Measurement in Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice. SSSA. Special Publication No. 30. Pp 123-141.

Baver, LD; WH Gardner & WR Gardner (Eds). 1972. Física de suelos. 1 edn en español. Unión tipográfica, Editorial Hispano-Americana.

Bayabil, HK; CR Stoof; J Lehmann; B Yitaferu & TS Steenhuis. 2015. Assessing the potential of biochar and charcoal to improve soil hydraulic properties in the humid Ethiopian Highlands: The Anjeni watershed. Geoderma 243-244:115–123.

Bezerra de Oliveira, L. 1968. Determinação do macro e microporosidade pela "mesa de tensão" em mostras de solo com estrutura indeformada. Pesquisa Agrop Bras 3:197-200.

Blanco-Canqui, H. 2017. Biochar and soil physical properties. Soil Sci Soc Am J 81:687–711.

Bremner, JM & Mulvaney, CS. 1982. Nitrogen-Total. In: Page, AL; RH Miller & DR Keeney (Eds). Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. 2nd edn. Pp. 595-624. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.

Burke, W; D Gabriels & J Bouma.1986. Soil Structure Assessment. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

Busscher, WJ; JM Novak; DE Evans; DW Watts; MAS Niandou & M Ahmedna. 2010. Influence of pecan biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand. Soil Sci 175:10-14.

Cheng, CH; J Lehmann & M Engelhard. 2008. Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface charge along a climosequence. Geochim Cosmochim Acta 72:1598–1610.

Cuellas, MV. 2017. Horticultura periurbana, análisis de la fertilidad de los suelos en invernaderos. Chilean J. Agric. Anim. Sci., ex Agro-Ciencia 33(2): 163-173.

Cusack, DF; J Axsen; R Shwom; L Hartzell-Nichols; S White & KRM Mackey. 2014. An interdisciplinary assessment of climate engineering strategies. Front Ecol Environ 12(5): 280–287.

De Bedia, GR; JM Navall; LA Auhad. 2016. Carbón Santiagueño: Características de un mercado en crecimiento. Disponible en: https://inta.gob.ar/documentos/carbon-santiagueno-caracteristicas-de-un-mercado-en-crecimiento (08/03/2020).

Di Rienzo, JA; AW Guzmán & F Casanoves. 2002. A Multiple Comparisons Method based on the Distribution of the Root Node Distance of a Binary Tree. J Agr Biol Envir St 7(2):1-14.

Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. 2008. InfoStat, versión 2008, Grupo InfoStat, FCA, UNC, Argentina.

Defensoría del Pueblo & Universidad Nacional de La Plata (DP & UNLP). 2015. Relevamiento de la utilización de agroquímicos en la Provincia de Buenos Aires. Defensoría del Pueblo-Universidad Nac. La Plata. 532 pp.

Downie, A; A Crosky & P Munroe. 2009. Physical properties of biochar. In: J Lehmann & Joseph S (eds.). Biochar for environmental management: Science and technology. Pp. 13-32. Earthscan.

Gaskin, JW; C Steiner; K Harris; KC Das & B Bibens. 2008. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar

for agricultural use. T Am Soc Agric Biol Engin 51:2061-2069.

Głąb, T; J Palmowska; T Zaleski & K Gondek. 2016. Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil. Geoderma 281:11–20.

Hillel, D. 1980. Soil water: content and potential. In: Hillel, D (ed). Fundaments of soil physics. Academic Press. Pp 123–165.

González, J; G Cruzate & JL Panigatti (eds). 2013. Suelos de la costa NE del Río Paraná (prov. de Bs.As.). Ediciones INTA. 141 pp.

Indawan, E; SU Lestari & N Thiasari. 2018. Sweet Potato Response to Biochar Application on Sub-optimal Dry Land. J Degrade Min Land Manage 5(2):1133-1139.

INTA-EMBRAPA (Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuaria - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). 2011. “Evaluación de cultivos de cobertura de suelo en la sucesión de cultivos hortícolas, bajo manejo agroecológico.” Proyecto binacional Llamado 22/2011. Agricultura Familiar, Agroecologia y Hortalizas. CABA. 13 pp

Jeffry, S; FGA Verheijen; M van der Velde & AC Bastos. 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. Agr Ecosyst Environ 144(1):175-187.

Jin, Z; C Chen; X Chen; F Jiang; I Hopkins; X Zhang; Z Han; Grace Billy & J Benavide. 2019. Soil acidity, available phosphorus content, and optimal biochar and nitrogen fertilizer application rates: A five-year field trial in upland red soil, China. Field Crops Res 232:77-87.

Joseph, SD; M Camps-Arbestain; Y Lin; P Munroe; CH Chia; J Hook; L van Zwieten; S Kimber; A Cowie; BP Singh; J Lehmann; N Foidl; RJ Smernik & JE Amonettel. 2010. An investigation into the reactions of biochar in soil. Aust J Soil Res 48(6/7):501-515.

Keiblinger, KM; F Zehetner; A Mentler & S Zechmeister-Boltenstern. 2018. Biochar application increases sorption of nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate in soil. 2018. Environ Sci Pollut Res 25:11173-11177.

Keith, A; B Singh & BP Singh. 2011. Interactive priming of biochar and labile organic matter mineralization in a smectite-rich soil. Environ Sci Technol 45(22):9611-9618.

Lehmann, J; G Guant & and M Rondon. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review. Mitig Adapt Strat Gl 11:403–27.

Liang B; J Lehmann; D Solomon; S Sohi; JE Thies; JO Skjemstad; FJ Luizão; MH Engelhard; EG Neves & Sue Wirick. 2008. Stability of biomass derived black carbon in soils. Geochim Cosmochim Acta 72:6096–6078.

Liu Z; X Chen; Y Jing; Q Li; J Zhang & Q Huang. 2014. Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil. CATENA 123:45-51.

Mac Loughlin, TM; L Peluso & DJG Marino. 2017. Pesticide impact study in the peri-urban horticultural area of Gran La Plata, Argentina. Sci Total Environ 598:572–580.

Nelson DW & LE Sommers. 1996. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 677 S. Segoe Rd, Madison, WI 53711, USA. Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods-SSSA Book Series no. 5.

Nguyen, BT; J Lehmann, WC Hockaday; S Joseph & CA Masiello. 2010. Temperature sensitivity of black carbon decomposition and oxidation. Environ Sci Technol 44(9):3324-3331.

Paladino, IR; AC Sokolowski; J Irigoin; H Rodriguez; MC Gagey; MB Barrios; J De Grazia; S Debelis; J Wolski & A. Bujan. 2018. Soil properties evaluation in horticultural farms of Florencio Varela, Buenos Aires, Argentina. Environ Earth Sci 77:411.

Programa Nacional de horticultura, floricultura y aromáticas (PNHFA). 2018. Manejo de los suelos hortiflorícolas. Edición digital ISSN 2591-5622. Disponible en: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_-_boletin_suelos_ndeg_10.pdf (26/02/2020)

Richards, LA. 1928. The usefulness of capillary potential to soil moisture and plant investigations. J Agric Res 37: 719-742.

Singh, B; LM Macdonald; S Kookana Rai; L van Zwieten; G Butler; S Joseph; A Weatherley; B Kaudal Bhawana; A Regan; J Cattle; F Dijkstra; M Boersma; S Kimber; A Keith & M Esfandbod. 2014. Opportunities and constraints for biochar technology in Australian agriculture: looking beyond carbon sequestration. Soil Res 52:739-750.

Smider, B & B Singh. 2014. Agronomic performance of a high ash biochar in two contrasting soils. Agr Ecosyst Environ 191:99–107.

Soil Survey Laboratory Staff. 1992. Soil survey laboratory methods manual. Soil Surv Invest Reps 42. USDA- SCS, Washington DC.

Streubel, JD; HP Collins; M Garcia-Perez; J Tarara; D Granatstein & CE Kruger. 2011. Influence of contrasting biochar types on five soils at increasing rates of application. Soil Sci Soc Am J, 75(4):1402-1413.

Ullé, JA (Ed). 2013. Bases tecnológicas de sistemas de producción agroecológicos: nodos agrícola-ganadero, horticultura orgánica y cultivos perennes. Ediciones INTA.

United Nations (Un). 2019. United Nations Decade on Ecosystem Restoration (2021–2030). A/RES/73/284.

Ullé, JA,; H Marti; V Faggioli; ML Darder; MJ Dalpiaz; LS Garcia; AE Farroni; FM Rimatori; DA Colombini; F Villalba;

F Martinez & P Ortega Y Villasana. 2014. Indicadores de calidad edafica en cultivos antecesores consociados y monocultivo de batata. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 5 – 9 mayo 2014. Bahía Blanca, Argentina.

Walter, R & BKR Rao. 2015. Biochars influence sweet-potato yield and nutrient uptake in tropical Papua New Guinea. J. Plant Nutr Soil Sci 178:393-400.

Wang J; Z Chen; Z Xiong; C Chen; X Xu; Q Zhou & Y Kuzyakov. 2015. Effects of biochar amendment on greenhouse gas emissions, net ecosystem carbon budget and properties of an acidic soil under intensive vegetable production. Soil Use Manag 31: 375–383.

Zhang, A; L Cui; G Pan; L Li; Q Hussain; X Zhang; J Zheng & D Crowley. 2010. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China. Agri Ecosys Environ 139(4):469-475.

Zimmerman, AR. 2010. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar). Environ Sci Technol 44(4):1295-1301.